Épistemologie de la gravité quantique canonique - Gravité quantique à boucles

Nicolae Sfetcu

22.02.2020

Sfetcu, Nicolae, «Épistemologie de la gravité quantique canonique - Gravité quantique à boucles», SetThings (22février 2020), URL = https://www.telework.ro/fr/epistemologie-de-la-gravite-quantique-canonique-gravite-quantique-a-boucles/

Email:nicolae@sfetcu.com

Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/

Une traduction partielle de
Sfetcu, Nicolae, "Epistemologiagravitațieiexperimentale – Raționalitateaștiințifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = https://www.telework.ro/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/

TESTS PROPOSÉS POUR LE GQC 3

GRAVITÉ QUANTIQUE À BOUCLES 5

BIBLIOGRAPHIE 11

Dans l'interprétation de la gravité quantique canonique (GQC), la gravité apparaît comme une pseudoforce géométrique, elle est réduite à la géométrie espace-temps et devient un simple effet de la courbure de l'espace-temps[1]. (Maudlin[2]). Lehmkuhl[3] soutient que le formalisme canonique ne confirme pas cette interprétation. RG associe la gravité à l'espace-temps, mais le type d'association n'est pas fixé[4]. Au lieu de l'interprétation géométrique, on peut utiliser l'interprétation de champ (la géométrie espace-temps est réduite à un champ gravitationnel, respectivement la métrique, considérée comme « juste un autre champ ») ou l'interprétation égalitaire (une identification conceptuelle de la gravité et de l'espace-temps en RG[5]). Ces interprétations alternatives réduisent les différences conceptuelles entre la RG et d'autres théories de champ.

L'instrumentalisme permet d'ignorer la gravité quantique, car il ne conçoit les théories scientifiques que comme des outils prédictifs. La gravité quantique canonique suit une théorie quantique non perturbative du champ gravitationnel. Il est basé sur la cohérence entre la mécanique quantique et la gravité, sans chercher à unifier tous les champs. L'idée principale est d'appliquer des procédures de quantification standard à la théorie générale de la relativité. Pour cela, il est nécessaire que la relativité générale soit exprimée sous forme canonique (hamiltonienne) puis quantifiée comme d'habitude. Cela a été (partiellement) réussi par Dirac[6] et (différemment) par Arnowitt, Deser et Misner.[7]

---

[1]Kian Salimkhani, « Quantum Gravity: A Dogma of Unification? », in *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science, vol 9.*, éd. par Alexander Christian et al. (Cham: Springer, 2018), 23–41.

[2]Tim Maudlin, « On the Unification of Physics », *Journal of Philosophy* 93, nº 3 (1996): 129–144.

[3]D. Lehmkuhl, D. Dieks, et M. Redei, « Is spacetime a gravitational field?, in The Ontology of Spacetime II, Volume 4 - 1st Edition », 2008, 83–110, https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6.

[4]Lehmkuhl, Dieks, et Redei, 84.

[5]Lehmkuhl, Dieks, et Redei, 84.

[6]Paul A. M. Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics* (Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012).

[7]R. Arnowitt, S. Deser, et C. W. Misner, « The Dynamics of General Relativity », *General Relativity and Gravitation* 40, nº 9 (septembre 2008): 1997-2027, https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1.

Tests proposés pour le GQC

Carlip déclare, en référence à la gravité quantique : « La mesure suprême de toute théorie est son accord avec la Nature ; si nous n'avons pas de tels tests, comment saurons-nous si nous avons raison ? »[8] Habituellement, une nouvelle théorie est construite en utilisant les données expérimentales disponibles, qui tente de faire correspondre les modèles phénoménologiques, puis de vérifier par des prédictions. Souvent, la cohérence conceptuelle et formelle est contournée pour tenter de correspondre à la réalité. En gravité quantique, tout se passe très différemment : il est presque entièrement basé sur la cohérence conceptuelle et formelle, ainsi que sur les contraintes imposées, et semble impossible à aborder par la recherche expérimentale. Dean Rickles déclare que le test de base de toute théorie scientifique est un test expérimental, sans lequel la théorie s'emmêle dans les mathématiques pures ou, pire, la métaphysique.[9]

Giovanni Amelino-Camelia a lancé un nouveau programme de recherche appelé « phénoménologie gravitationnelle quantique », dans lequel elle essaie de transformer la recherche sur la gravitation quantique en une véritable discipline expérimentale. L'échelle à laquelle les effets gravitationnels quantiques se produisent est déterminée par les différentes constantes physiques de la physique fondamentale :h, c et G, qui caractérisent les phénomènes quantiques, relativistes et gravitationnels. En combinant ces constantes, nous obtenons les constantes de Planck auxquelles les effets de la gravité quantique doivent se manifester.

Ce sont avec plusieurs ordres de grandeur au-delà des capacités expérimentales actuelles. Mais l'argument de l'échelle s'applique aux événements gravitationnels quantiques individuels. L'idée est de combiner de tels événements pour amplifier les effets qui peuvent être détectés avec un équipement actuel ou proche. La gravité quantique peut également être étudiée en observant l'extrémité opposée du spectre d'échelle, les systèmes astronomiques, en observant le rayonnement cosmique, les explosions générant des rayons gamma, les explosions Kaon, les particules, la lumière et le rayonnement de fond cosmique, par le biais d'effets gravitationnels quantiques qui pourraient se manifester dans ces systèmes. Dans ces systèmes, les effets d'échelle de Planck sont naturellement amplifiés.

Nom	Formule	Valeur (SI)
Longueur Planck	$l_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1{,}616229(38)\times10^{-35}$ m

[8]S. Carlip, « Quantum Gravity: a Progress Report », *Reports on Progress in Physics* 64, nº 8 (1 août 2001): 64: 885, https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301.

[9]Dean Rickles, « Quantum Gravity: A Primer for Philosophers. », Preprint, octobre 2008, http://philsci-archive.pitt.edu/5387/.

Masse Planck	$m_P = \sqrt{\hbar c/G}$	$2{,}176470(51)\times10^{-8}$ kg
Temps Planck	$t_P = l_P/c = \hbar/m_P c^2 = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5{,}39116(13)\times10^{-44}$ s
Charge Planck	$q_P = \sqrt{4\pi\varepsilon_0\hbar c} = e/\sqrt{\alpha}$	$1{,}875\,545\,956(41) \times 10^{-18}$ C
Température Planck	$T_P = m_P c^2/k_B = \sqrt{\hbar c^5/G k_B^2}$	$1{,}416808(33)\times10^{32}$ K

Tableau 3.1 Les constantes Planck

Mais de tels effets peuvent également être étudiés dans des dispositifs expérimentaux sur Terre, utilisant également des « expériences naturelles », telles que des particules se déplaçant sur de grandes distances à des vitesses énormes[10]. Bryce DeWitt a soutenu que les effets gravitationnels quantiques ne seront pas mesurables sur les particules élémentaires individuelles, car le champ gravitationnel lui-même n'a pas de sens à ces échelles. Le champ statique d'une telle particule ne dépasserait pas les fluctuations quantiques.[11]

Afin d'utiliser l'univers comme dispositif expérimental, l'idée est que la lumière change ses propriétés sur de longues distances dans le cas d'un espace-temps discret, ce qui produit des effets biréfringents[12]. La base théorique est qu'une onde se propageant dans un espace-temps discret violera l'invariance de Lorentz, qui peut être un « test » pour tester des modèles de gravité quantique. Mais la différence d'espace-temps n'est pas une condition suffisante pour la non-invariance de Lorentz : un contre-exemple est les ensembles causaux qui sont des structures discrètes et ne semblent pas la violer.

[10]Rickles.

[11]B. S. DeWitt et Louis Witten, *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*, First Edition edition (John Wiley & Sons, 1962), 372.

[12]Rodolfo Gambini et Jorge Pullin, « Quantum Gravity Experimental Physics? », *General Relativity and Gravitation* 31, nº 11 (1 novembre 1999): 1999, https://doi.org/10.1023/A:1026701930767.

Gravité quantique à boucles

La gravité quantique à boucles (GQB) tente d'unifier la gravité avec les trois autres forces fondamentales en commençant par la relativité et en ajoutant des traits quantiques. Il est basé directement sur la formule géométrique d'Einstein.

Dans GQB, l'espace et le temps sont quantifiés tout comme l'énergie et la quantité de mouvement en mécanique quantique. L'espace et le temps sont granuleux et discrets, avec une taille minimale. L'espace est considéré comme un tissu extrêmement fin ou un réseau de boucles finies, appelées réseaux de spin ou mousse de spin, avec une taille limitée à moins que l'ordre d'une longueur de Planck, environ 10^{-35} mètres. Ses conséquences s'appliquent mieux à la cosmologie, dans l'étude de l'univers primitif et de la physique du Big Bang. Sa prédiction principale, non vérifiée, implique une évolution de l'univers au-delà du Big Bang (Big Bounce).

Toute théorie de la gravité quantique doit reproduire la théorie de la relativité générale d'Einstein comme une limite classique. La gravité quantique doit pouvoir revenir à la théorie classique lorsque $\hbar \rightarrow 0$. Pour cela, les anomalies quantiques doivent être évitées, afin de n'avoir aucune restriction sur l'espace physique de Hilbert sans correspondant en théorie classique. Il s'avère que la théorie quantique a moins de degrés de liberté que la théorie classique. Lewandowski, Okolow, Sahlmann et Thiemann[13] d'une part, et Christian Fleischhack[14] d'autre part, ont développé des théorèmes qui établissent l'unicité de la représentation de la boucle telle que définie par Ashtekar. Ces théorèmes excluent l'existence d'autres théories dans le programme de recherche GQB et donc, si GQB n'a pas la limite semi-classique correcte, cela signifierait la fin de la représentation GQB dans son intégralité.

Le programme gravité quantique canonique traite la métrique espace-temps comme un champ et la quantifie directement, l'espace étant divisé en grains tridimensionnelles. Le programme consiste à réécrire la relativité générale sous forme « canonique » ou « hamiltonienne »[15], à travers un ensemble de variables de configuration qui peuvent être encodées dans un espace de phase. L'évolution dans le temps de ces variables, les mouvements physiques possibles dans l'espace des phases, une famille de courbes, sont ensuite quantifiés, et l'évolution

[13]Jerzy Lewandowski et al., « Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras », *Communications in Mathematical Physics* 267, nº 3 (1 novembre 2006): 267 (3): 703–733, https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7.

[14]Christian Fleischhack, « Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity », *Physical Review Letters* 97, nº 6 (11 août 2006): 97 (6): 061302, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302.

[15]Karel Kuchař, « Canonical Quantization of Gravity », *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237-88, https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.

dynamique est générée à l'aide de l'opérateur hamiltonien[16]. Ainsi apparaissent certaines contraintes des variables canoniques imposées après quantification.

En gravité canonique à boucles, Ashtekar a utilisé un ensemble différent de variables avec une métrique plus complexe[17], atténuant plus facilement les contraintes. Grâce aux changements introduits dans le diagramme, toutes les caractéristiques géométriques standard de la relativité générale peuvent être récupérées[18]. L'avantage de cette version est un plus grand contrôle (mathématique) sur la théorie (et sa quantification).

Le programme GQB exige qu'une théorie de l'espace-temps soit indépendante du fond, contrairement à la théorie des cordes où l'espace-temps est traité comme un fond fixe. GQB utilise la formulation hamiltonienne ou canonique de la RG. L'avantage d'une formulation canonique d'une théorie est la facilité et la standardisation de la quantification. Les boucles du GQB nous donnent une description de l'espace. A l'intersection des boucles apparaissent des nœuds qui représentent des unités de base de l'espace, qui est donc discret ; deux nœuds reliés par un lien représentent deux unités d'espace côte à côte. La surface est déterminée par les intersections avec les boucles. On peut ainsi imaginer un graphe (réseau de spin)[19] constitué de certains nombres quantiques qui lui sont attachés. Les nombres déterminent les surfaces et les volumes d'espace[20]. Le problème du temps dans GQB est d'incorporer le temps dans cette image.

La GQB considère la RG comme un point de départ, auquel il applique une procédure de quantification pour arriver à une théorie quantique viable de la gravité. Dans la procédure de quantification, appelée quantification canonique, il est nécessaire de reformuler la RG comme un système hamiltonien, permettant ainsi une évolution temporelle de tous les degrés de liberté du système. Les formules hamiltoniennes respectives divisent le grain d'espace-temps des hypersurfaces spatiales tridimensionnelles, à travers un formalisme appelé ADM d'après ses auteurs (Richard Arnowitt, Stanley Deser et Charles Misner). Le formalisme ADM suppose que les métriques induites sur les surfaces spatiales sont des variables de « position » et une combinaison linéaire des composantes de courbure extérieure de ces hypersurfaces

---

[16]Steven Weinstein et Dean Rickles, « Quantum Gravity », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/.

[17]Carlo Rovelli, « Notes for a brief history of quantum gravity », *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 juin 2000, http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061.

[18]Lee Smolin, « The case for background independence », *arXiv:hep-th/0507235*, 25 juillet 2005, 196–239, http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235.

[19] Le réseau de spin est un graphedont les nœudsreprésentent des « grains » d'espace et dont les liens représentent des surfaces qui séparentces grains, représentant un étatquantique du champ gravitationnelou de l'espace.

[20]Keizo Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research* (FilosofiskaInstitutionen, Uppsala universitet, 2012).

codant leur incorporation dans l'espace-temps à 4 dimensions comme des variables « quantité de mouvement » conjuguées canoniquement avec les métriques[21]. Les équations hamiltoniennes résultantes ne sont pas équivalentes aux équations du champ d'Einstein. Pour les rendre équivalentes, des restrictions doivent être introduites, entraînant certaines conditions pour les données initiales. La première famille de contraintes code la liberté de choisir la foliation (contrainte hamiltonienne), et le deuxième ensemble de contraintes concerne la liberté de choisir les coordonnées dans l'espace tridimensionnel (contraintes vectorielles), ce qui donne un total de quatre équations de contraintes. Dans le GQB, il existe une famille de contraintes supplémentaires liées aux symétries internes. Jusqu'à présent, seules deux des trois familles de contraintes ont été résolues. La procédure de quantification canonique est réalisée selon Paul Dirac[22], transformant les variables canoniques en opérateurs quantiques qui agissent sur un espace d'état quantique.

L'utilisation du formalisme ADM a été frappée par des complications techniques insurmontables.Ainsi, dans les années 1980, AbhayAshtekar a introduit de nouvelles variables qui simplifiaient les équations des contraintes, avec l'inconvénient de perdre la signification géométrique directe des variables ADM. Dans ce cas, la géométrie spatio-temporelle est capturée par un « champ triadique » qui code pour les cadres inertiels locaux définis sur des hypersurfaces spatiales, plutôt que les métriques. Le passage d'ADM aux variables Ashtekar représente une réinterprétation des équations du champ d'Einstein. La théorie généralisée de la relativité réinterprétée est ensuite soumise à la procédure canonique comme ci-dessus.[23]

Dans de nombreuses approches de la gravité quantique, y compris la théorie des cordes et le GQB, l'espace n'est plus une entité fondamentale, mais simplement un phénomène « émergent » qui découle de la physique de base[24]. Christian Wüthrich déclare qu'il n'est pas clair si nous pouvons formuler une théorie physique de manière cohérente en l'absence d'espace et de temps.[25]

Une approche plus récente consiste à utiliser des modèles dits de « mousse de spin »[26], qui utilisent l'intégration de chemin pour générer l'espace-temps. L'évolution dans le temps des réseaux de spin est supposée représenter l'espace-temps spatial en termes de mousse de spin.

---

[21]Christian Wuthrich, « In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity » (2011).

[22]Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

[23]Wuthrich, « In Search of Lost Spacetime ».

[24]Wuthrich.

[25]Christian Wuthrich, « To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity », Published Article or Volume, Philosophy of Science, 2005, 72 : 777-788, http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946.

[26]John W. Barrett et Louis Crane, « Relativistic spin networks and quantum gravity », *Journal of Mathematical Physics* 39, nº 6 (juin 1998): 32:3296–3302, https://doi.org/10.1063/1.532254.

GQB est un vaste programme de recherche actif, développé dans plusieurs directions avec le même noyau dur[27]. Deux directions de développement sont plus importantes : le GQB canonique plus traditionnel et le GQB covariant, appelé la théorie de la mousse de spin.

La gravité quantique à boucles résulte d'une tentative de formuler une théorie quantique indépendante du fond. Cela prend en compte l'approche de la relativité générale selon laquelle l'espace-temps est un champ dynamique et, par conséquent, un objet quantique. La deuxième hypothèse de la théorie est que la nature discrète quantique qui détermine le comportement similaire aux particules d'autres théories de champ affecte également la structure de l'espace. Il en résulte une structure granulaire de l'espace à la longueur de Planck. L'état quantique de l'espace-temps est décrit au moyen d'une structure mathématique appelée réseau de spin. Les réseaux de spin ne représentent pas des états quantiques d'un champ dans l'espace, mais des états quantiques de l'espace-temps. La théorie a été obtenue en reformulant la relativité générale à l'aide des variables d'Ashtekar[28]. Actuellement, il existe plusieurs heuristiques positives sur la base desquelles la dynamique de la théorie se développe.

La thermodynamique du trou noir tente de réconcilier les lois de la thermodynamique avec les horizons d'événements du trou noir. Un succès récent de la théorie est le calcul de l'entropie de tous les trous noirs non singuliers directement à partir de la théorie et indépendamment des autres paramètres. Il s'agit de la seule dérivation connue de cette formule à partir d'une théorie fondamentale, dans le cas de trous noirs génériques non singuliers. La théorie a également permis le calcul des corrections de gravité quantique à l'entropie et au rayonnement des trous noirs.

En 2014, Carlo Rovelli et Francesca Vidotto ont suggéré, sur la base de GQB, qu'il y a une étoile Planck à l'intérieur d'un trou noir, essayant ainsi de résoudre la protection du trou noir et le paradoxe de l'information du trou noir.

La *cosmologie quantique à boucle* (CQB) a prédit un Big Bounce avant le Big Bang. CQB a été développé en utilisant des méthodes qui imitent celles de GQB, qui prédit un « pont quantique » entre les branches cosmologiques contractantes et expansives. Grâce au CQB, les singularités du Big Bang, du Big Bounce et d'un mécanisme naturel d'inflation ont été prédits. Mais les résultats obtenus sont soumis à restriction en raison de la suppression artificielle des degrés de liberté. L'évitement des singularités dans la CQB se fait grâce à des mécanismes disponibles uniquement dans ces modèles restrictifs; l'évitement des singularités dans la théorie complète ne peut être atteint que par une caractéristique plus subtile du GQB.

La reproduction de la RG en tant que limite de basse énergie dans la GQB n'a pas été confirmée et les amplitudes de diffusion n'ont pas encore été calculées.

---

[27]Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

[28]Abhay Ashtekar, « New Variables for Classical and Quantum Gravity », *Physical Review Letters* 57, nº 18 (3 novembre 1986): 57 (18): 2244–2247, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244.

Les problèmes les plus pressants du GQB sont notre manque de compréhension de la dynamique (l'incapacité à résoudre l'équation de contrainte hamiltonienne) et l'incapacité d'expliquer comment apparaît l'espace lisse classique (comment RG réussit dans ce cas).

Un autre problème de la GQB est un problème général de la mécanique quantique : le temps. Carlo Rovelli et Julian Barbour ont essayé de formuler la mécanique quantique d'une manière qui ne nécessite pas de temps externe, remplaçant le temps en reliant directement les événements entre eux.[29]

Les effets de la gravité quantique sont difficiles à mesurer car la longueur de Planck est beaucoup trop petite, mais nous essayons de mesurer les effets des observations astrophysiques et des détecteurs d'ondes gravitationnelles. Il n'a pas encore été prouvé que la description GQB de l'espace-temps à l'échelle de Planck a la limite continue correcte décrite par la relativité générale avec d'éventuelles corrections quantiques. D'autres problèmes non résolus comprennent la dynamique de la théorie, les contraintes, le couplage avec les champs de matière, la renormalisation du graviton.[30]

Il n'existe pas encore une observation expérimentale pour laquelle GQB aurait fait une prédiction différente du modèle standard ou de la relativité générale. En raison de l'absence d'une frontière semi-élastique, GQB n'a pas reproduit les prédictions faites par la relativité générale.

La GQB a des difficultés à essayer de permettre la théorie de la relativité générale à la limite semi-classique, parmi lesquelles

- Il n'y a pas d'opérateur qui réponde aux difféomorphismes infinitésimaux, il doit être approximé par des difféomorphismes finis et donc la structure des parenthèses de Poisson classiques n'est pas exactement reproduite. Le problème peut être contourné en introduisant des contraintes.[31]
- La difficulté de concilier la nature combinatoire discrète des états quantiques avec la nature continue des champs de la théorie classique.
- Difficultés découlant de la structure des parenthèses de Poisson qui impliquent un difféomorphisme spatial et des contraintes hamiltoniennes.[32]
- Les mécanismes semi-classiques développés ne conviennent qu'aux opérateurs qui ne modifient pas le graphique.

---

[29]Carlo Rovelli, « Relational Quantum Mechanics », *International Journal of Theoretical Physics* 35, nº 8 (août 1996): 35 : 1637-1678, https://doi.org/10.1007/BF02302261.

[30]Hermann Nicolai, Kasper Peeters, et MarijaZamaklar, « Loop quantum gravity: an outside view », *Classical and Quantum Gravity* 22, nº 19 (7 octobre 2005): 22(19): R193–R247, https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01.

[31]Thomas Thiemann, *Modern Canonical Quantum General Relativity*, 1 edition (Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008).

[32]Thiemann.

- Le problème de la formulation d'observables pour la relativité générale en raison de sa nature non linéaire et de l'invariance du difféomorphisme espace-temps.[33]

GQB est une solution possible de la gravité quantique, tout comme la théorie des cordes mais avec des différences. Contrairement à la théorie des cordes qui postule des dimensions supplémentaires et des particules et symétries supplémentaires non observées, GQB est basé uniquement sur la théorie quantique et la relativité générale, et sa portée se limite à la compréhension des aspects quantiques de l'interaction gravitationnelle. De plus, les conséquences du GQB sont radicales, modifiant fondamentalement la nature de l'espace et du temps.

[33]B. Dittrich, « Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems », *General Relativity and Gravitation* 39, nº 11 (1 novembre 2007): 39 (11): 1891–1927, https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2.

Bibliographie

Arnowitt, R., S. Deser, et C. W. Misner. « The Dynamics of General Relativity ». *General Relativity and Gravitation* 40, nº 9 (septembre 2008): 1997-2027. https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1.

Ashtekar, Abhay. « New Variables for Classical and Quantum Gravity ». *Physical Review Letters* 57, nº 18 (3 novembre 1986): 2244-47. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244.

Barrett, John W., et Louis Crane. « Relativistic spin networks and quantum gravity ». *Journal of Mathematical Physics* 39, nº 6 (juin 1998): 3296-3302. https://doi.org/10.1063/1.532254.

Carlip, S. « Quantum Gravity: a Progress Report ». *Reports on Progress in Physics* 64, nº 8 (1 août 2001): 885-942. https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301.

DeWitt, B. S., et Louis Witten. *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*. First Edition edition. John Wiley & Sons, 1962.

Dirac, Paul A. M. *Lectures on Quantum Mechanics*. Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012.

Dittrich, B. « Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems ». *General Relativity and Gravitation* 39, nº 11 (1 novembre 2007): 1891-1927. https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2.

Fleischhack, Christian. « Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity ». *Physical Review Letters* 97, nº 6 (11 août 2006): 061302. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302.

Gambini, Rodolfo, et Jorge Pullin. « Quantum Gravity Experimental Physics? » *General Relativity and Gravitation* 31, nº 11 (1 novembre 1999): 1631-37. https://doi.org/10.1023/A:1026701930767.

Kuchař, Karel. « Canonical Quantization of Gravity ». *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237-88. https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.

Lehmkuhl, D., D. Dieks, et M. Redei. « Is spacetime a gravitational field?, in The Ontology of Spacetime II, Volume 4 - 1st Edition », 2008. https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6.

Lewandowski, Jerzy, Andrzej Okołów, Hanno Sahlmann, et Thomas Thiemann. « Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras ». *Communications in Mathematical Physics* 267, nº 3 (1 novembre 2006): 703-33. https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7.

Matsubara, Keizo. *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research*. FilosofiskaInstitutionen, Uppsala universitet, 2012.

Maudlin, Tim. « On the Unification of Physics ». *Journal of Philosophy* 93, nº 3 (1996): 129–144.

Nicolai, Hermann, Kasper Peeters, et MarijaZamaklar. « Loop quantum gravity: an outside view ». *Classical and Quantum Gravity* 22, nº 19 (7 octobre 2005): R193-247. https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01.

Rickles, Dean. « Quantum Gravity: A Primer for Philosophers. » Preprint, octobre 2008. http://philsci-archive.pitt.edu/5387/.

Rovelli, Carlo. « Notes for a brief history of quantum gravity ». *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 juin 2000. http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061.

———. « Relational Quantum Mechanics ». *International Journal of Theoretical Physics* 35, nº 8 (août 1996): 1637-78. https://doi.org/10.1007/BF02302261.

Salimkhani, Kian. « Quantum Gravity: A Dogma of Unification? » In *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science, vol 9.*, édité par Alexander Christian, David Hommen, Nina Retzlaff, et Gerhard Schurz, 23–41. Cham: Springer, 2018.

Smolin, Lee. « The case for background independence ». *arXiv:hep-th/0507235*, 25 juillet 2005. http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235.

Thiemann, Thomas. *Modern Canonical Quantum General Relativity*. 1 edition. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008.

Weinstein, Steven, et Dean Rickles. « Quantum Gravity ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/.

Wuthrich, Christian. « In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity », 2011.

———. « To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity ». Published Article or Volume. Philosophy of Science, 2005. http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946.